集音器を用いた音源探索装置*

林 輝** 黒崎 靖規***

Noise Source Detection Using a Parabolic Reflector

Teru HAYASHI and Yasunori KUROSAKI

Noise suppression is one of the important subject in mechanical engineering, and many studies related to the subject have been reported. As an immediate approach, some visualization techniques of the sound field are proposed, but most of them require long time to get the results, and a large scale equipment. In this paper, a simple method for noise source detection is proposed. Where the following result is utilized. The experimental results showed that a parabolic sound reflector forms a sound image near by the focus. A prototype detection system has been built, which consists of a 500 mm diameter parabolic reflector, a microphone array ($6 \times 8 = 48$ units), and a LED array to display the sound image. For a point noise source of 5 kHz sine wave or pseud random wave, the direction of the source could be determined by the position of sound image. For double point noise sources of 5 kHz sine wave, about 15 degrees of angular resolution was obtained. This method enabled to detect the noise source in real time, and is expected to be applied for fluctuating noise source.

Key words : noise source detection, parabolic reflector, sound image, microphone array, LED array

1. 結 言

近年、工作機械から建設機械に至るまで、すべての機械に発生音の低減が要求され、この解決が機械工学、工業分野の大きな問題となっている。そのため、機械音の測定、その発生原因の解明、低減対策などが活発に検討され、実施されている。しかし、一般に機械音の発生機構は複雑であり、簡単な一對の歯車においてさえも、複数の発生原因が考えられ、そのうちのいずれが支配的であるのか決定できない場合も多い。このような時は普通、実際の問題についての測定、分析を行い、その結果と、発生音の特性についての実験や、理論解析から得られる情報とを比較することにより、真の原因に近づく方法が採られている。こうして得られる結果から機械音の発生位置が正しく求まれば、それは機械装置の設計における重要な判断材料になる。

機械音の発生源を知る方法としては、まず、装置に近接したマイクロホンまたは加速度計による振動・騒音測定が考えられるが、精度を上げるために測定点数を増やすと全体の把握が困難になる上、非定常的な音の場合にはその測定にも問題が生じる。また、装置から離れたマイクロホンの走査により装置全体の音圧分布を求める方法も提案されているが¹⁾²⁾、測定装置が大掛かりになったり、測定・解析に時間がかかり、発生音に定常性が求められることなどから、現場における手軽な使用には向いていない。

本研究では、パラボラ反射面を持つ集音器を音響レンズとして用いる音源測定法を提案し、この方式を用いた測定装置の特性、及び音源検出の可能性について検討を加えている。

2. 理 論 解 析

同じ波動であることから、音波に対しても光と同じようにレンズや反射面を考えることができる。しかし、大きな違いとしては騒音として扱う周波数帯域(可聴域)が9オクターブ以上と可視光の1オクターブ以内に比べて広いことと、耳の敏感な音域(4kHz前後)において波長が数cmと使用する音響素子の寸法、数十cmに比べて長いことが挙げられる。音響レ

* 原稿受付 昭和58年11月11日。昭和56年度精機学会春季大会学術講演会(昭和56年3月24日)および昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和56年11月5日)にて発表

** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町4259)

*** 学生会員 東京工業大学大学院

Fig. 1 Calculation of the sound field

レンズは、波板やパンチ板の形状を工夫して音響経路を変え位相差からレンズの働きをさせるもので、オーディオ用高音スピーカの指向性改善などに用いられているが、構造が複雑になって装置全体の重量が増すことが考えられるため、本論文ではパラボラ反射面を用いた音響系を考えた。

パラボラ面が軸に平行に入射する平面音波を焦点に集めることは光学系との対応から容易に推測できるが、この時の焦点付近の音圧分布、さらに斜方から球面波が入射するといった一般的な条件における音圧分布を求めることは容易でない。球面集束波源の作る音場についての研究は既に幾つかなされているが³⁾⁴⁾、パラボラ面による反射を考える場合はヘルムホルツ・キルキホッフの積分をそのまま数値計算するのが実用的と考えられる。

一般に、点音源 P から反射面 S を経て受音点 Q に至る球面波の作る音場の速度ポテンシャル ϕ_0 は、反射面上の微小面素を dS とすると近似的に次の式で表せる⁵⁾。

$$\phi_0 = a \frac{e^{-ikr_0}}{r_0} + \frac{ia}{2\lambda} \iint_S \frac{e^{-ik(r_1+r_2)}}{r_1 \cdot r_2} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) dS \quad (1)$$

ここで、 a は音源の強さに対応する係数、 i は虚数単位、 k は波長を λ とした時の波数 ($2\pi/\lambda$)、 θ_1, θ_2 は微小面素 dS の法線と各音響経路 r_1, r_2 の成す角を示している (図 1)。この式による近似は $r_1, r_2 \gg \lambda$ の条件で成り立ち、第 1 項は音源からの直接音、第 2 項は集音器からの反射音の成分を示すが、2 次的な反射は無視した。音圧は媒質の密度を ρ 、音の伝播速度を c とすると $ick\rho\phi_0$ で与えられる。

図 2 は z 軸上で、口径 A の反射面から L だけ離れた点に波長 $\lambda=0.136A$ の点音源を置いた時に、パラボラの頂点から f だけ離れた軸上にできる音圧分布の計算結果を示している。 L が大きくなるに従って、最大音圧が低下すると共にそのピークの位置も変化しており、このピークは音源に対応した像と考えること

Fig. 2 Sound pressure distribution on the axis
 $\lambda/A=0.136$ Fig. 3 Sound pressure distribution on the image plane
 $L/A=3, f/A=0.24, \lambda/A=0.136$

ができる。図 3 は、 $L/A=3$ とした場合の音圧ピークを通り、 z 軸に垂直な平面 (像面) 内の音圧分布を計算した結果で、横軸は z 軸からの変位を示している。実線は音源が z 軸上 ($l/L=0$) にある場合で、像面でも z 軸上に大きなピークが現れている。このピークは音源の z 軸からの距離 l を変えると移動し (図の破線)、音源に対応した像と考えられる。像の両側の小さな山は側帯波と考えられ、像を中心に同心円状に現れる。パラボラ反射面は近距離の音源に対し理想的なものとは言えないが、図 2、図 3 に示した次元 (波長、口径、深さ等) では理想的なものに近い回転楕円面に対してもほぼ同様の計算結果が得られた。

3. パラボラ反射面の実験

パラボラ面による実際の結像を調べるため、市販の集音器 (直径 500 mm, 焦点距離 105 mm) を用いた

Fig. 4 Frequency response
 $L = 1500$ mm, $f = 120$ mm

Fig. 5 Sound pressure distribution on the axis
 (pseud random noise)

実験を行った。反射面の材質は厚さ 5 mm の透明プラスチックであるが、今回目的とした音域 (5 kHz 前後) において各媒質の音響インピーダンスから求めた音の反射率はほぼ 1 になっている⁶⁾。測定は反射音の比較的小さい部屋で行い、音源の直径 50 mm のスピーカには疑似白色雑音を加えた。

図 4 はパラボラ集音器の周波数特性を調べた結果で、マイクロホン単体に比べ、2~10 kHz の周波数において 10~20 dB 程度の音圧上昇が得られる。800 Hz 付近でゲインが得られないのは、この周波数において、測定に用いたマイクロホンが反射面の前にできる定在波の節 (反射面から約 110 mm) に位置していたためである。

図 5 は、対称軸上にあるスピーカから疑似白色雑音を発生させた時に、反射面の前にできる音圧分布を測定した結果で、音源と反射面に関する寸法の次元は図 3 に示している。ここでは高い周波数成分を含んでい

Fig. 6 Relation between image plane and source distance

Fig. 7 Sound pressure distribution on the image plane
 Pseudo random noise, $L = 1500$ mm, $f = 120$ mm

るため、音圧の山は図 3 (5 kHz の音に相当) に比べて鋭くなっているが、ピークの現れる位置は一致している。また、各ピークの音圧は音源までの距離 L が倍になるごとに約 6 dB 低下し、自由音場の点音源に対する減衰特性に近い結果を示した。

図 5 の音圧ピークの位置と音源までの距離の関係を書き直すと図 6 のようになる。この関係はほぼ反比例しており、反射面の半径 130 mm の円周部分における音波の入射角と反射角の関係 (図の破線) に近いことから、この部分がこの反射面の主点面になっていると考えられる。この音源までの距離と軸上の音圧ピークの関係がわかっていれば、音源までの距離を測定することができるが、単レンズによる測距と同じで、近い音源に対しては正確であっても距離が離れるにつれて誤差は大きくなることが予想される。

図 8 は、図 5 における音圧のピーク点を通り、軸に

Fig. 8 Positions of the image and the source

Fig. 9 Experimental setup

垂直な平面（像面）の音圧分布の測定結果を示している。ここでは、疑似白色雑音を用いたため図2に見られた側帯波ははっきり現れていないが、音源と像の位置関係は計算結果とほぼ等しくなった（（ ）内は図2の次元）。

図7に示した像面内の像の位置 l' と音源の軸からの変位 l の関係を書き直すと図8になる。これらの関係はほぼ比例していることから、像面内の音圧分布を検出し、そのまま表示することで、音源の位置を推定することができる。

4. 音源探索装置の構成

パラボラ反射面の前面にできる像から実際の音源位置を推定するためには、像面の音圧分布を知る必要がある。計算機等を用いた複雑な信号処理が必要な場合は、マイクロホンの走査が適当と考えられるが、前節で述べたように、像の位置と音源の位置は比例関係にあるため、本研究では実時間表示が可能ないように複数のマイクロホンを並べたマイクアレイを用いた。

図9に試作した音源探索装置の構成を示す。前節の

Fig. 10 Sound image of a single source

実験に使用したパラボラ集音器が取り付けられている台には、焦点付近を軸方向に動かせるようにしたマイクアレイ（ $6 \times 8 = 48$ 個）が載せてある。像面で検出された音圧分布は、ゲインを同時に変えられる電圧制御アンプ（48 ch）で増幅され、マイクアレイと同様に配列したLEDアレイにより明暗で表示される。マイクユニットの直径は10 mmであるため、マイクアレイ面の大きさは 60×80 mmとなり、音源を検出できる範囲は反射面から見て、横約 23° 、縦約 17° となっている。また、マイクロホンの密度から決まる音源の角度分解能は約 4° となる。この装置の特性を調べる実験も反射音の少ない部屋で行い、音の信号には5 kHzの正弦波と疑似白色雑音を用いた。

図10に、1つの音源から音を出した時にLEDアレイ上に表示される像を示す。(a)は、5 kHzの正弦波に対する像で、音源が軸上にないため像は中央に現れていないが、発光の中心位置は音源の方向に対応している。正弦波は干渉性を持つため、(a)の状態のままアンプのゲインを上げた(b)では、周辺部に側帯波による発光が見られる。この側帯波は音源位置の推定の妨げになるが、発光は像を中心にした環状に現れるため、大きな問題とはならない。(c)は疑似白色雑音を用いた時の像で、広い周波数成分を含むため干渉が現れにくく、ゲインが大きい場合でも側帯波による発光は見られない。

これらの像は図6の関係から求まる像面の位置にマイクアレイ面を置いて得られたもので、マイク面がこの位置からずれると像の音圧低下と共に側帯波の相対的な強度が高まり、像の検出は難しくなる。このことから、像のコントラストによって音源までの距離を推定することもある程度可能であるが、正確な測定は困難であろう。また、音源が軸から離れた場合は図7の破線に示したように像の音圧は低下するが、この減少

(c) Double source

$L = 150 \text{ cm}$
 $f = 120 \text{ mm}$
 Pseud random noise

Fig. 11 Sound image of double sources

分は個々のアンプのゲインの調整で補正した。しかし、この特性は周波数に依存するため、異なる周波数における定量的な測定では測定範囲を対称軸の近傍に限るか、イコライザによって補正する必要がある。

図 11 は、非干渉性の疑似白色雑音を用いて、水平に置かれた 2 つの音源に対する像を調べた結果を示している。(a), (b) は、それぞれ一方のスピーカから音を出した時の像で、同時に音を出した (c) ではそのまま (a), (b) の重ね合わせになっている。この時、2 つの音源と反射面の成す角度は 15° となっており、実際の機械装置でも周波数帯域の広い騒音を発生させている場合は、同様の測定で音源方向の推定が可能と考えられる。

これに反して、干渉性のある音を発生する複数の音源に対しては、音源の位置関係、周波数、位相差によって像面の音圧分布は大きく変化し、単純な重ね合わせとはならない。図 12 は、5 kHz の音を出す 2 つの音源(間隔 $270 \text{ mm} \approx 4.0\lambda$)によりできる像を調べた結果で、音源と反射面の成す角度は約 10° となっている。(a) は 2 つの音源の位相差が 0° (同相) の時の像で、音源に対応する像はつながってしまう。像の形が楕円であるため複数の音源が存在することは推定できるが、音源の数や正確な位置を決めることはできない。(b) は音源の位相差が 180° (逆相) の時の像で、2 つの像が現れているが、その位置は片方ずつ音を出した時の位置より外側になり、音源の実際の位置には対応していない。

位相差による像の位置のずれは、音源と反射面の成す角度を大きくすることで改善できる。図 13 は、図 12 の状態から音源の間隔を広げた時(間隔 $390 \text{ mm} = 5.7\lambda$)の像で、位相差により像の形は異なっているが、ピークの現れる位置はほぼ実際の音源に対応する

Fig. 12 Sound image of coherent double sources
 $L = 1500 \text{ mm}$, $f = 120 \text{ mm}$, 5 kHz sine wave sources and reflector make 10° of angle

Fig. 13 Sound image of coherent double noise sources
 $L = 1500 \text{ mm}$, $f = 120 \text{ mm}$, 5 kHz sine wave sources and reflector make 15° of angle

位置になった。この時、音源と反射面の成す角度は約 15° となっており、音源間隔を広げずに反射面を音源に近づけた場合でも同じ角度で音源位置の確認ができたことから、この音源探索装置の角度分解能は 5 kHz で約 15° と考えられる。

5. 特性の検討

像面内にできる像の直径(側波帯との間の谷の直径)は小さい程、音源探索装置としては有利になる。この像の直径 d は、反射波が集束波面を作るとすると、反射面の開口角を ϕ 、音の波長を λ として次式で表せる⁷⁾。

$$d = \frac{\lambda}{\sin \phi} \quad (2)$$

ここで用いた反射面では $\phi \approx \pi/2$ から $d \approx \lambda$ となり、

これより小さな像は望めない。しかし、分解能は反射面の寸法に対する像の直径の比で決まるため、反射面の直径を大きくすることで分解能の向上が見込まれる。

光学望遠鏡におけるレイリーの角度分解能 α の判定規準は、レンズの口径を D とすると次式で表せる。

$$\alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{rad}) \quad (3)$$

この式は非干渉性の波を仮定したものだが、実験に用いたパラボラ反射面に適用できるとすると、5 kHz ($\lambda=6.8$ cm), $D=50$ cm で $\alpha \approx 10^\circ$ となり、干渉が生じないとしてもこれ以上の分解能は望めない、機械音の測定では音の波長を変えるのは困難と考えられるため、より高い分解能を得るには反射面の直径を広げる必要がある。

集音器を用いた音源探索装置の分解能は、反射面の直径、音の波長、干渉性等によって左右されるが、測定条件に応じて反射面を選ぶことで、騒音発生の主な原因となる音源位置を推定することは可能と考えられる。その場合、本方式の利点として音源の方向の実時間表示が可能、装置が他の方式に比べて小形なことなどが挙げられ、設置された機械装置の出す定常的な音のほかに、走行中の自動車の出す騒音のような非定常音の測定にも応用が考えられる。

6. 結 言

本研究により得られた結論をまとめると以下のようになる。

- (1) 実験と計算により、音波についても光と同じようにパラボラ反射面の焦点付近に像を結ぶことが確認された。
- (2) この像のできる面の音圧分布を検出し、表示する音源探索法により、音源の位置を推定することができる。
- (3) 試作した音源探索装置では、5 kHz の純音に対して約 15° の角度分解能が得られ、音源方向の検出ができた。

なお、本方式は、音源位置の実時間測定が可能なことから非定常音源の測定への応用が有望と考えられる。

最後に、本研究の糸口を与えて下さった東京工業大学・奥島基良教授に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) S. Ueha, M. Fujinami, K. Umezawa and J. Tsujiuchi: Image of Acoustic Radiation Sources with Acoustical Holography, *Optica Acta*, **23**, 107, (1976).
- 2) K. Nishida and O. Tobei: Sound Field Produced by the Vibration of Rectangular Solid Structure and Sound Visualization, *Bull. Japan Soc. Prec. Engg.*, **15**, (1981) 267.
- 3) H. T. O'Neil: Theory of Focusing Radiators, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **21**, (1949) 516.
- 4) B. G. Lucas and T. G. Muir: The Field of a Focusing Source, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **72**, (1982) 1289.
- 5) 村田和美: 光学, サイエンス社 (1979) 78.
- 6) 実吉純一: 電気音響工学, コロナ社 (1957) 24.
- 7) F. G. Smith and J. H. Thomson (戸田盛和, 坂柳義巳, 和達三樹訳): 光学 I, 共立出版 (1976) 84.